



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 17924

**To link to this article** : DOI:10.4000/geomorphologie.11692

URL : <http://geomorphologie.revues.org/11692>

<p><b>To cite this version</b> : Jantzi, Hugo and Carozza, Jean-Michel and Probst, Jean-Luc and Valette, Philippe <i>Ajustements géomorphologiques du chenal de la moyenne Garonne en aval de Toulouse au cours des 200 dernières années (sud-ouest, France)</i>. (2017) Géomorphologie: relief, processus, environnement, vol. 23 (n°2). pp. 139-153. ISSN 1957-777X Item availability restricted.</p>
---

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Ajustements géomorphologiques du chenal de la moyenne Garonne en aval de Toulouse au cours des 200 dernières années (sud-ouest, France)

*Geomorphological adjustments of channel of the middle Garonne River downstream of Toulouse over the last 200 years (South West, France)*

Hugo Jantzi, Jean-Michel Carozza, Jean-Luc Probst et Philippe Valette

## 1. Introduction

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, de nombreuses rivières ont vu leur morphologie et leur dynamique hydro-sédimentaire se modifier significativement tant à l'échelle du bassin versant que de la plaine ou du lit mineur/chenal. De multiples études ont mis en évidence le rôle majeur des interventions anthropiques et les ajustements morphologiques qui en

ont découlé, notamment à partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. C'est le cas en France par exemple du Buëch et de la Drôme dans les Alpes du sud (Gautier, 1994 ; Landon et al., 1998 ; Liébault et Piégay, 2002), de l'Isère, l'Arve et du Giffre dans les Alpes du Nord (Peiry et al., 1994 ; Piégay et Peiry, 1997) ou encore de l'Italie (Surian et Rinaldi, 2003 ; Surian et Cisotto, 2007 ; Comiti et al., 2011 ; Ziliani et Surian, 2012 ; Campana et al., 2014 ; Scorpio et al., 2015). En effet, de nombreuses rivières ont vu leur chenal se contracter et s'inciser sous l'effet d'interventions directes dans le lit mineur comme les extractions de granulats (Kondolf, 1997 ; Rinaldi et al., 2005 ; Martín-Vide et al., 2010), les travaux de chenalisation (Piégay et al., 2009), la construction de barrages (Kondolf, 1997), ou dans le bassin versant avec le reboisement des versants (Liébault et Piégay, 2002 ; Piégay et al., 2004) et les changements d'occupation du sol. Ces interventions ont entraîné une altération de la dynamique sédimentaire qui se traduit souvent par une réduction de la charge alluviale, une discontinuité dans le transit sédimentaire entre l'amont et l'aval et une limitation des recharges par les apports latéraux. Cette réduction des apports solides se traduit par un excès d'énergie du cours d'eau par rapport à la charge solide disponible entraînant un phénomène d'incision. Toutefois, si les activités humaines ont un rôle majeur dans la modification hydro-morphologique des cours d'eau, les facteurs naturels constituent une autre cause d'ajustements important. C'est le cas par exemple de la rivière Toutle dans l'État de Washington qui, à la suite de l'éruption du Mont St. Helens, a vu son fonctionnement changer radicalement (Simon, 1992). Il est à noter également que durant les deux derniers siècles la variabilité hydro-climatique a été importante avec le passage d'un régime dominé par les crues durant le XIX<sup>e</sup> siècle et correspondant à la phase terminale du PAG (Petit Age Glaciaire), à un régime dominé par les étiages à partir du XX<sup>e</sup> siècle (Erskine et Warner, 1998). La seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle se caractérise par une crise torrentielle où les événements extrêmes se multiplient (Gob et al., 2008 ; Antoine, 2009). Dans les Alpes françaises du nord par exemple, la réponse des cours d'eau au PAG s'est traduite par une forte activité hydro-sédimentaire ayant induit un élargissement et une aggradation de ces derniers et dans de nombreux cas a entraîné une métamorphose fluviale avec le passage d'un style à chenal unique à un style en tresse (Bravard, 1989). Miramont et al. (1998) mettent aussi en évidence le rôle prépondérant des forçages climatiques et des crues exceptionnelles du XIX<sup>e</sup> siècle dans la morphogenèse très active de la moyenne Durance dans les Alpes du sud.

La Garonne, à l'instar de nombreux cours d'eau, a vu sa morphologie et sa dynamique hydro-sédimentaire se modifier significativement au cours du XX<sup>e</sup> siècle, notamment durant la seconde moitié du siècle. Cette période correspond à une forte augmentation des interventions humaines dans le lit mineur. À partir de 1960, les extractions de granulats se sont intensifiées avec l'industrialisation de l'activité sur une grande partie du linéaire du cours d'eau (Beaudelin, 1989) qui, en parallèle, a fait l'objet d'aménagements lourds afin de stabiliser les berges et limiter l'érosion (Valette et al., 2014). De manière concomitante, le fond du chenal s'est incisé de manière significative, entraînant une simplification de la mosaïque fluviale et une dégradation du fonctionnement hydro-morphologique et écologique (Décamps et al., 1988 ; Steiger et al., 1998, 2000). Sur la période 1960-1985, une incision d'environ 1,5 m dans les secteurs touchés par les extractions entre Toulouse et Castelsarrasin est rapportée par Beaudelin (1989). Cependant, ces travaux concentrés sur la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle ne permettent pas de mettre en perspective la spécificité éventuelle de cette période et de quantifier l'importance de cette rupture dans le fonctionnement du cours d'eau.

L'objectif de ce travail est de retracer l'évolution des ajustements verticaux et latéraux de la moyenne Garonne de Toulouse et jusqu'à sa confluence avec le Tarn. La période considérée couvre les 200 dernières années, entre 1830 et les années 2000. Il s'agit (i) de dégager une périodisation des ajustements morphologiques, (ii) de déterminer leur intensité en les quantifiant et (iii) de mettre en évidence le rôle qu'ont pu avoir les facteurs de contrôle hydro-climatique et anthropique sur cette évolution. L'accent sera mis sur l'évolution altitudinale à l'échelle du linéaire fluvial, les travaux antérieurs n'ayant abordé cette question qu'à l'échelle de quelques sites et uniquement pour la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Beaudelin, 1989 ; Lalanne-Bertoudicq et al., 1989 ; Steiger et Gazelle, 1994 ; Steiger et al., 1998, 2000).

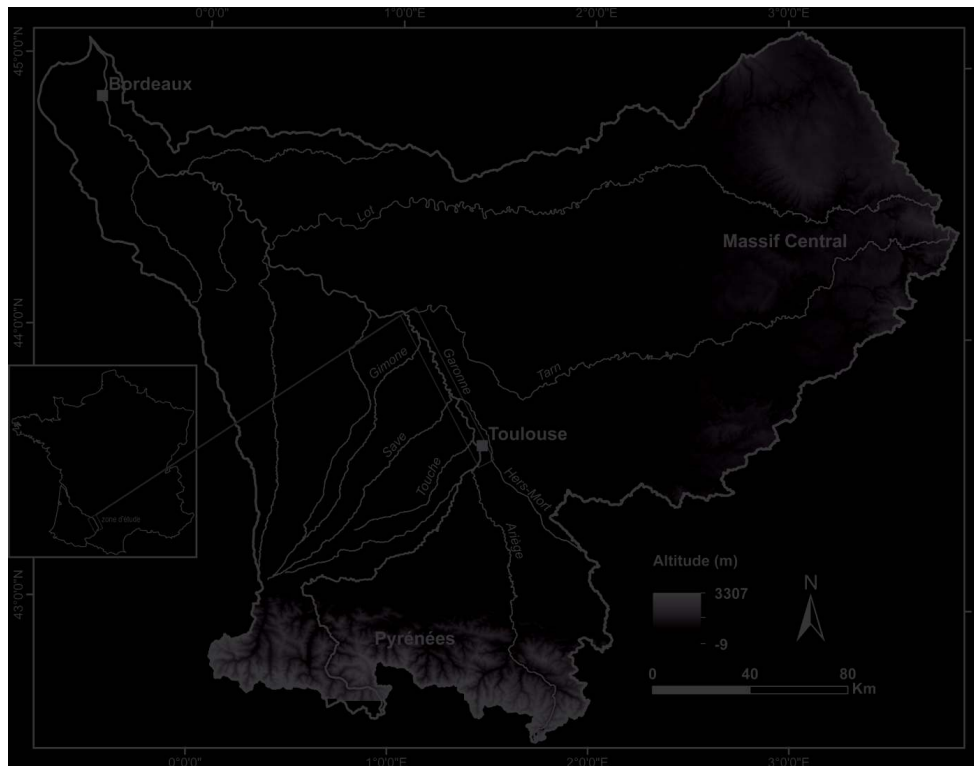
## 2. Site d'étude

La moyenne Garonne toulousaine correspond au tronçon du fleuve entre Toulouse et la confluence avec le Tarn, soit un linéaire d'environ 90 km qui traverse les départements de la Haute-Garonne et du Tarn-et-Garonne (fig. 1). D'une surface drainée de 30 900 km<sup>2</sup> au niveau de la confluence avec le Tarn, son module calculé sur une période de 107 ans est de 190 m<sup>3</sup>/s. Le cours d'eau présente actuellement un tracé à chenal le plus souvent unique et se caractérise par un indice de sinuosité moyen faible de 1,27 (David, 2016). La pente reste modérée, voisine de 0,9·10<sup>-3</sup> m/m. L'écoulement se fait fréquemment sur un fond rocheux composé de molasse qui affleure sur environ 50 % de la surface totale du chenal (Delmouly et al., 2007).

Le régime hydrologique de la moyenne Garonne est de type pluvio-nival (Lambert, 1989), caractérisé par des crues qui peuvent être violentes. Le débit moyen journalier maximal estimé pour une crue de temps de retour 50 ans est de 2 800 m<sup>3</sup>/s. Le débit de la crue de référence du 23 juin 1875, qui a atteint une hauteur de 8,3 m à Toulouse, est estimé à 7 170 m<sup>3</sup>/s. À l'inverse, durant la période estivale, la Garonne peut présenter des étiages sévères avec un débit mensuel minimal de 65 m<sup>3</sup>/s (source : Banque Hydro - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie - <http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

En raison de sa forte instabilité latérale, la Garonne a fait l'objet de nombreux aménagements (épis, digues, rescindements de méandres, etc.) principalement entre 1960 et 1984 notamment en Tarn-et-Garonne (Valette, 2002). Ils visaient à la fixation des berges et à limiter l'érosion des terres agricoles riveraines. Concernant les obstacles à l'écoulement, seul trois centrales hydro-électriques situées dans Toulouse sont présentes, le reste du linéaire étant dépourvu d'obstacle jusqu'à la confluence avec le Tarn (Source : Onema « Office national de l'eau et des milieux aquatiques », Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie – Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE) – <http://www.onema.fr/le-roe>). C'est également à partir de 1960 que les extractions de granulats se sont développées de manière intensive et cela jusqu'à la fin des années 1980. Ces interventions dans le lit mineur ont favorisé le phénomène de chenalisation dont l'impact le plus significatif est l'incision « généralisée » du cours d'eau d'environ -1,5 m (Beaudelin, 1989 ; Steiger et al., 2000). La morphologie actuelle du cours d'eau semble donc n'avoir été acquise que très récemment. Au début des années 1960, il est encore fait état d'une couverture alluviale d'épaisseur comprise entre 1,5 et 3 m (Beaudelin, 1989). Néanmoins, des affleurements rocheux dont la présence est observée dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (Harlé, 1895), attestent d'une discontinuité au moins locale de la couverture alluviale le long du cours d'eau.

Fig. 1 – Carte de localisation du secteur d'étude (source : BD ALTI ® IGN).  
 Fig. 1 – Location map of the study area (source: BD ALTI ® IGN).



### 3. Méthodologie

#### 3.1. Analyse des ajustements latéraux

L'évolution planimétrique du chenal au travers de sa largeur a été étudiée à partir de 5 cartes historiques datées de 1830, 1868 et des années 1940, 1970 et 2000. Les échelles sont comprises entre 1:10000 (1830, 1868, années 1940) et 1:25000 (années 1970 et 2000). Les cartes numérisées ont fait l'objet d'un géoréférencement de type polynôme de 1<sup>er</sup> ordre sous SIG en prenant comme référence le Scan25 des années 2000 déjà géoréférencé. Le nombre de points d'amer par km<sup>2</sup> pour chaque carte est de 0,59 (1830), 1,50 (1868), 1,79 (années 1940) et 0,71 (années 1970). L'erreur moyenne quadratique issue du géoréférencement est comprise entre 1 et 8 m pour les cartes de 1868 aux années 2000 et de 34 m pour la carte de 1830. Cette dernière présente une erreur de calage bien plus importante que les autres. Elle a cependant été utilisée en raison de la disponibilité d'un profil en long contemporain qui permet de disposer d'une année de référence commune comme point de départ de l'analyse des ajustements morphologiques. Cet ensemble de cartes a déjà fait l'objet d'une analyse détaillée concernant l'évolution planimétrique et du style fluvial (David, 2016 ; David et al., 2016). Afin de comparer les largeurs aux différentes dates, les bandes actives à chaque date ont été digitalisées puis une enveloppe commune de divagation a été créée ainsi que son axe médian. L'enveloppe de divagation a ensuite été découpée en tronçons de 500 m de long au centre desquels a été créé un axe médian perpendiculaire, le long duquel la largeur a été mesurée une fois pour chaque

date perpendiculairement au chenal, permettant une comparaison aux différentes dates selon des axes communs.

### 3.2. Analyse des ajustements verticaux

Les données disponibles pour quantifier les ajustements verticaux sont peu nombreuses sur la moyenne Garonne, en raison notamment de l'absence d'enjeux pour la navigation. L'analyse de l'évolution verticale du chenal a été réalisée à partir de trois profils en long : un profil de la ligne d'eau à l'étiage datant de 1830 et de source anonyme, un profil de 1860 réalisé par les Ponts et Chaussées comprenant la ligne d'eau à l'étiage et le fond et un profil des années 1990 du fond établis à partir d'un ensemble de profils en travers réalisés par les Directions Départementales des Territoires de Haute-Garonne et du Tarn-et-Garonne d'une part, et d'autre part d'Électricité de France (Simeoni-Sauvage, 1999 ; Larnier, 2010). Les densités de points au kilomètre pour les trois profils en long sont respectivement de 1,3, 1 et 1,9. Il existe également un profil en long de la ligne d'eau datant de 1920 mais qui n'a pas été exploité car levé en période de hautes eaux et ne permettant pas une comparaison avec les lignes d'eau à l'étiage. Entre 1860 et les années 1990, aucun profil en long exploitable n'est donc disponible sur l'intégralité du linéaire étudié. Des profils en travers réalisés au droit d'ouvrages d'art ainsi que des données topographiques issues du projet d'aménagement du lit en Tarn-et-Garonne, ont donc été utilisés pour densifier l'information sur cette période et affiner la chronologie de l'ajustement vertical du chenal. Ces données proviennent des Directions Départementales des Territoires et des Conseils Départementaux de Haute-Garonne et du Tarn-et-Garonne. Lorsqu'elles existent, les altitudes du fond ont été privilégiées car elles permettent de s'affranchir des variations des lignes d'eau liées aux variations des débits d'un levé à un autre. Afin de pouvoir comparer les données aux différentes dates, les profils en long ont été recalés entre eux en x et y à partir de repères de référence considérés comme stables dans le temps (ponts et affluents) et dont les points kilométriques sont connus. Les levés topographiques anciens de 1830 à 1920 ont également été recalés en z afin de faire correspondre leur système altimétrique au système actuel (IGN 69). À partir des profils en long, des points communs entre profils ont été créés à intervalles réguliers de 500 m et leur valeur d'altitude calculée par interpolation linéaire simple. Les profils en travers étant accompagnés d'un plan de situation, leur localisation s'est faite directement sous un Système d'Information Géographique après géoréférencement des plans. Des données hydrologiques provenant de la « Banque Hydro » issues de stations limnimétriques localisées dans les parties amont (Portet-sur-Garonne) et médiane (Verdun-sur-Garonne) du cours d'eau complètent le jeu de données et sont utilisées pour estimer les hauteurs de débits à l'étiage et leur évolution.

### 3.3. Analyse des facteurs de contrôle

Afin d'appréhender le contexte dans lequel ont eu lieu les ajustements morphologiques de la Garonne au cours des deux derniers siècles, les facteurs de contrôle hydro-climatiques d'une part et anthropiques d'autre part ont été analysés. Les données hydro-climatiques reposent sur des chroniques de débits disponibles depuis 1910 à Portet-sur-Garonne en amont de Toulouse et depuis 1973 à Verdun-sur-Garonne dans la partie aval, complétée des hauteurs de crue mesurées au niveau du pont Neuf à Toulouse depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. À cela s'ajoutent des données pluviométriques depuis 1875 et

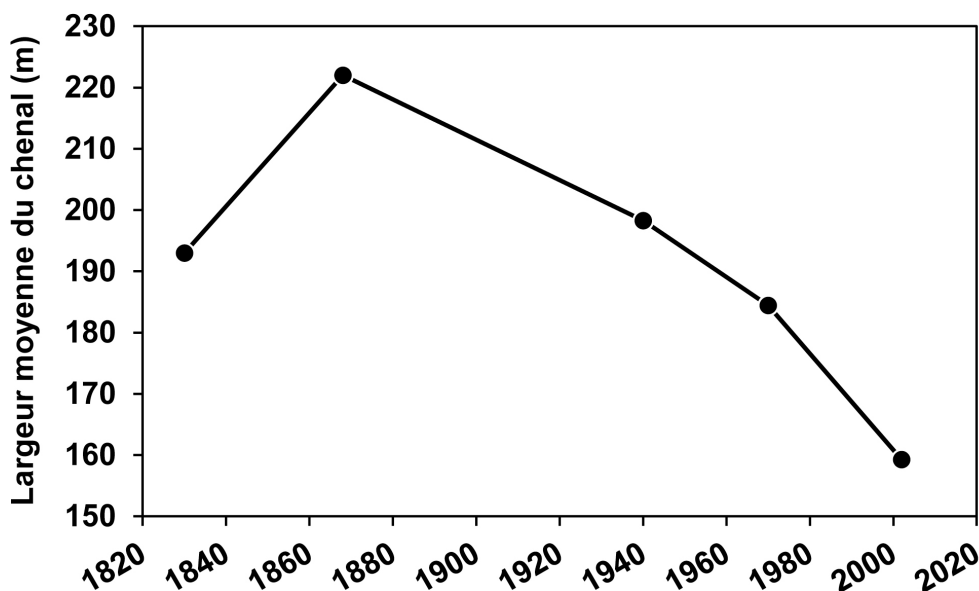
thermométriques depuis 1925 enregistrées à Toulouse. Les forçages anthropiques se répartissent à deux échelles spatiales. À l'échelle du bassin versant, il s'agit principalement de la mise en place de barrages et de l'évolution des boisements. L'évolution de la surface boisée en amont de la zone d'étude a été reconstituée à partir de la statistique forestière Mathieu (1878), de cadastres (1908 à 1961) et d'Inventaires Forestiers Nationaux (1967 à 2007). Les méthodes et les objectifs pour les différentes estimations n'étant pas les mêmes, leur précision et leur fiabilité varient mais permettent néanmoins d'avoir une estimation de l'évolution du boisement sur la période d'étude (Rousseau, 1990 ; Cinotti, 1996 ; Koerner et al., 2000). À l'échelle du lit mineur sur la zone d'étude, les activités humaines concernent les extractions de granulats et les aménagements visant à fixer le cours de la Garonne (Valette, 2012). Par rapport à ce dernier travail, la présente étude se propose de détailler la relation entre ajustements morphologiques et activités anthropiques dans le lit mineur.

## 4. Résultats

### 4.1. Évolution planimétrique du chenal

La comparaison des largeurs moyenne entre 1830 et les années 2000 met en évidence deux phases principales (fig. 2). Entre 1830 et 1868, le chenal se caractérise par un élargissement de 30 m en moyenne soit une vitesse de 0,76 m/an. À partir de 1868 et jusqu'aux années 2000, la dynamique s'inverse et le chenal enregistre une contraction de 63 m en moyenne, soit une réduction de près de 30 %. Au sein de cette phase de contraction, la vitesse du phénomène varie dans le temps notamment à partir des années 1970 avec une nette accélération. Si la vitesse de contraction du chenal n'est que de 0,33 m/an entre 1868 et les années 1940, cette dernière passe de 0,55 m/an entre les années 1940-1970 à 0,90 m/an entre les années 1970-2000.

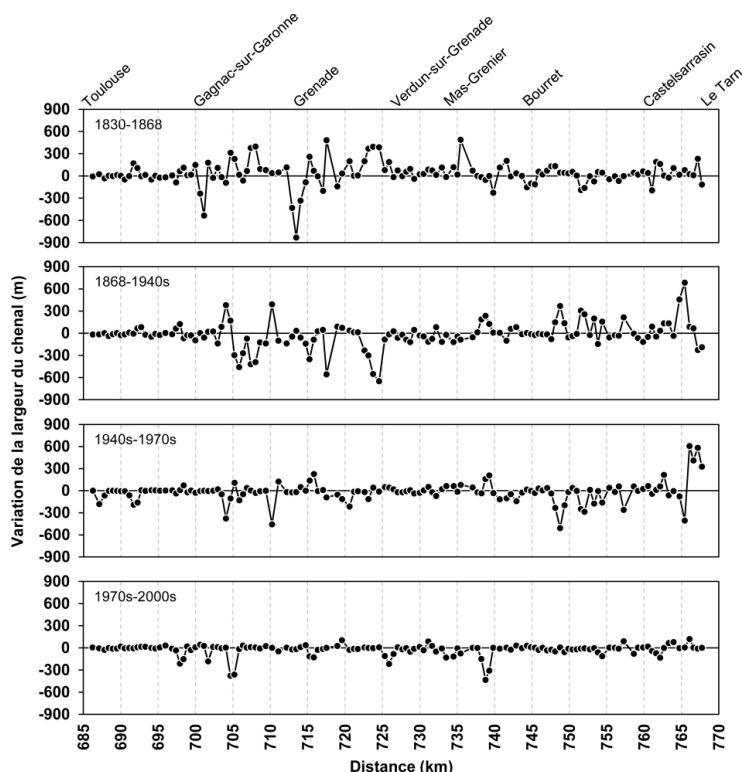
Fig. 2 – Évolution de la largeur moyenne du chenal entre 1830 et les années 2000.  
*Fig. 2 – Changes in mean channel width between 1830 and 2000s.*



L'analyse de l'évolution de la largeur du lit sur l'ensemble du linéaire, met en évidence des évolutions contrastées (fig. 3). Globalement, durant la période entre 1830 et les années 2000, le secteur amont situé entre Toulouse et Gagnac-sur-Garonne présente une évolution faible, proche de l'équilibre tout comme le secteur situé entre Verdun-sur-Garonne et Mas-Grenier. Dans le premier secteur, cette relative stabilité peut s'expliquer par la pression urbaine croissante exercée par la ville de Toulouse au cours du XIX<sup>e</sup> siècle et les aménagements de protection contre les crues mis en place. Dans le second secteur, la faible variabilité latérale peut s'expliquer par la présence en rive gauche d'une terrasse alluviale dite « rissienne » dont le talus d'une hauteur d'environ 20 m est sapé par la Garonne. À l'inverse, la partie comprise entre Gagnac-sur-Garonne et Verdun-sur-Garonne connaît les ajustements les plus importants. De 1830 à 1868, ce secteur montre une phase marquée par un élargissement important qui pourrait être attribué, mais sans certitude, à la présence de deux affluents importants de la Garonne (Hers-Mort et Save) qui, lors des crues majeures de 1835 et 1855, auraient pu être particulièrement actifs ou à une cause plus locale, éventuellement d'ordre anthropique mais non décelée dans les archives. La période de 1868 aux années 1940 se caractérise par une contraction liée aux rattachements de plusieurs complexes d'îles aux berges, phénomène qui se retrouve dans d'autres secteurs et qui explique la forte vitesse de contraction qui peut être observée localement à partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Des années 1940 à 2000, la contraction se poursuit notamment dans la partie aval. À l'instar de la partie amont, le linéaire fluvial au niveau de Bourret présente également une évolution générale modérée, même si l'on peut distinguer une alternance entre élargissement et contraction à l'échelle locale. Dans la partie aval, entre Bourret et la confluence avec le Tarn, l'élargissement s'opère entre 1868 et 1940 puis laisse place à une phase de contraction importante des années 1940 à 1970 sous l'effet des travaux de stabilisation de la Garonne ayant entre autre entraînés la fermeture de plusieurs bras secondaires. Le fort élargissement immédiatement en amont de la confluence avec le Tarn est un artefact lié à la construction de la retenue de Malaucène. Des années 1970 à 2000, la tendance à la contraction se poursuit mais reste très localisée.



Fig. 3 – Évolution de la largeur du chenal entre 1830 et les années 2000.  
 Fig.3 – Channel width variations between 1830 and 2000s.



Le système kilométrique provient du référentiel hydrographique BD Carthage de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

The kilometric system comes from the hydrographic database BD Carthage of the National institute of geographic and forest information (IGN).

## 4.2. Évolution altimétrique du chenal

La comparaison des données topographiques disponibles entre 1830 et 2010 met en évidence deux phases principales. La première concerne le XIX<sup>e</sup> siècle et se caractérise par une dynamique d'aggradation. Sur la période 1830-1860, le chenal montre un exhaussement sur une grande partie du linéaire. En moyenne celui-ci atteint +0,6 m et une valeur maximale de +2,4 m est enregistrée à Gagnac-sur-Garonne (fig. 4). Néanmoins localement, le chenal présente déjà de fortes incisions. C'est notamment le cas dans le secteur situé en amont de la confluence avec le Tarn où l'incision peut atteindre -2,4 m. À partir de 1860, l'évolution altitudinale au droit de ponts (tab. 1) permet d'entrevoir une poursuite de l'exhaussement du chenal jusqu'en 1920, avec une aggradation moyenne de +1,9 m. Par exemple, pour les ponts de Gagnac-sur-Garonne, Mauvers et Bourret, l'exhaussement est compris entre +3,8 m et +4,5 m. Ces valeurs paraissent exceptionnelles et pourraient correspondre à un effet de site. L'incertitude sur la qualité des sources utilisées pourrait également expliquer une éventuelle surestimation des valeurs. Toutefois, même entachée d'une incertitude, l'aggradation, au vu des valeurs importantes observées, reste établie à l'échelle locale pour la période 1860-1920.

Tab. 1 – Variation de l'élévation du chenal à hauteur de ponts entre 1860 et 2010.  
*Tab. 1 – Bed elevation changes at the level of bridges between 1860 and 2010.*

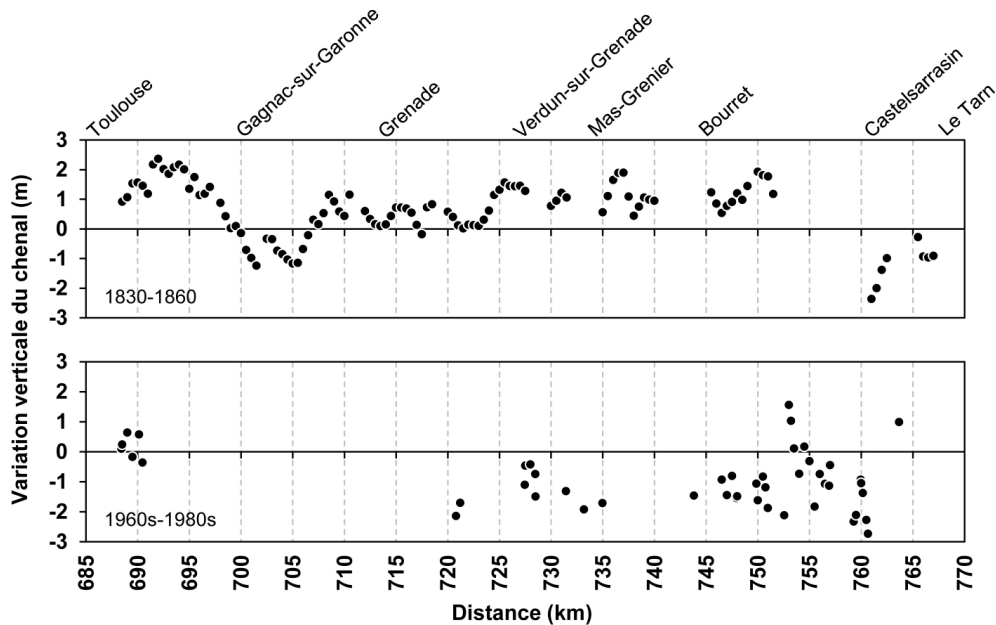
Station - Pk (km)	Période	Variation (m)
<b>Toulouse A62</b> 688,43	1860-1920	+0,50 <sup>1</sup>
	1920-1967	-0,56 <sup>1</sup>
	1967-1987	+0,10 <sup>1</sup>
	1987-2005	-0,18 <sup>1</sup>
<b>Blagnac</b> 690,46	1860-1920	+0,03 <sup>1</sup>
	1920-1967	-1,42 <sup>1</sup>
	1967-1988	-0,36 <sup>1</sup>
	1988-2010	-0,06 <sup>1</sup>
<b>Gagnac</b> 700,93	1860-1920	+4,20 <sup>1</sup>
	1920-1975	-2,38 <sup>1</sup>
	1975-1989	+0,33 <sup>1</sup>
	1989-2011	-0,25 <sup>1</sup>
<b>Ondes</b> 713,62	1860-1920	+0,48 <sup>1</sup>
	1920-1981	-0,82 <sup>1</sup>
	1981-1987	-0,71 <sup>1</sup>
	1987-2008	+0,45 <sup>1</sup>
<b>Mauvers</b> 721,20	1860-1920	+3,88 <sup>1*</sup>
	1920-1987	-1,70 <sup>1</sup>
	1957-1987	-1,70 <sup>1</sup>
<b>Verdun</b> 727,46	1860-1920	+0,34 <sup>1</sup>
	1920-1960	-0,90 <sup>1</sup>
	1960-1990	-1,15 <sup>1</sup>
	1987-2010	-0,24 <sup>1</sup>
<b>Bourret 1</b> 743,81	1860-1920	+4,50 <sup>1</sup>
	1920-1987	-1,89 <sup>1*</sup>
	1959-1987	-1,49 <sup>1</sup>
<b>Bourret 2</b> 744,15	1987-2004	-0,44 <sup>1</sup>
<b>Belleperche 1</b> 750,75	1920-1967	-0,02 <sup>1</sup>
	1967-1987	-1,18 <sup>1</sup>
<b>Belleperche 2</b> 750,96	1860-1920	+1,63 <sup>1</sup>
	1920-1967	-0,73 <sup>1</sup>
	1967-1987	-1,87 <sup>1</sup>
<b>Très Cassés</b> 756,90	1860-1920	+1,67 <sup>1</sup>
	1920-1961	-1,28 <sup>1</sup>
	1961-1987	-0,68 <sup>1</sup>
	1987-2004	+0,25 <sup>1</sup>
<b>Variation</b> (cm/a)	1860-1920	+3,19
	1920-1980s	-2,55
	1960s-1980s	-4,32
	1990s-2000s	-0,37

Les valeurs sont calculées à partir du fond du chenal<sup>1</sup> et de la ligne d'eau à l'étiage<sup>2</sup>. Les valeurs avec un astérisque proviennent de Lalanne-Bertoudicq et al. (1989).

*The values are calculated from the bottom of the channel<sup>1</sup> and waterline at lowstage<sup>2</sup>. Values with an asterisk are from Lalanne-Bertoudicq et al. (1989).*

À partir de 1920, la tendance s'inverse et le chenal commence à s'inciser (tab. 1). Sur la période 1920-1990, la valeur moyenne d'enfoncement du chenal peut être estimée à -1,7 m soit -2,6 cm/an. Entre les années 1960 et 1990, période durant laquelle les activités anthropiques dans le lit mineur sont les plus intenses, l'enfoncement s'accélère très nettement avec une moyenne de -1 m soit -3,6 cm/an et des valeurs pouvant être supérieures à -2 m localement (tab.1, fig. 4). Une des conséquences les plus emblématiques de cette incision est la rupture en 1981 d'une conduite de gaz posée en souille à hauteur de Beauzelle (Beaudelin, 1989). Cet incident a été interprété comme la conséquence d'une vague d'érosion régressive mise en place en réponse à une extraction de granulats environ 300 m en aval au début des années 1970 (Beaudelin, 1989). La vitesse de propagation de l'érosion vers l'amont peut être estimée approximativement à 27 m/an.

Fig. 4 – Variation de l'élévation du chenal entre 1830-1860 et 1960s-1980s.  
Fig. 4 – Bed elevation changes between 1830-1860 and 1960s-1980s.



Le système kilométrique provient du référentiel hydrographique BD Carthage de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

The kilometric system comes from the hydrographic database BD Carthage of the National institute of geographic and forest information (IGN).

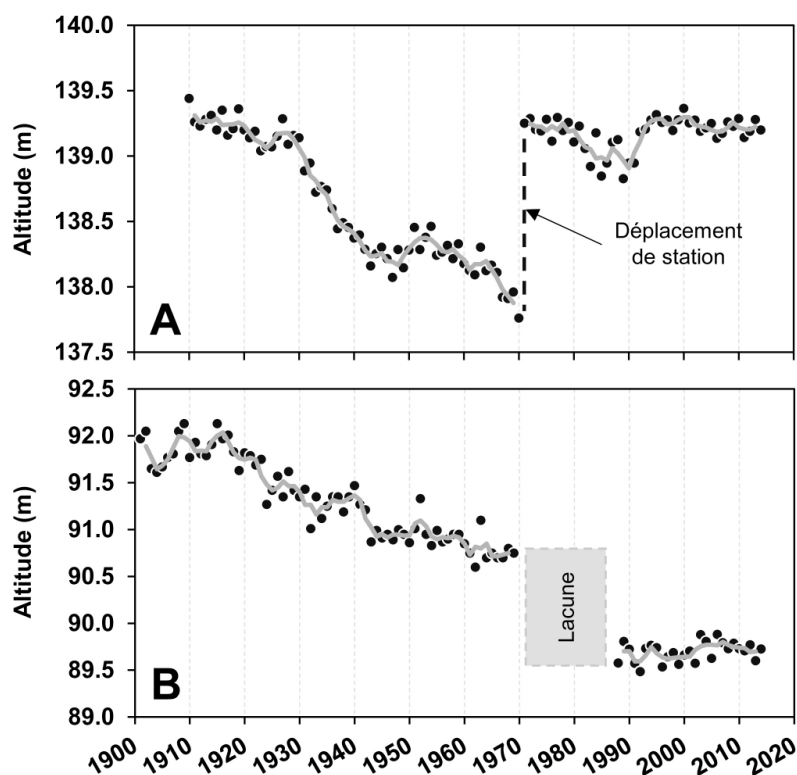
Les hauteurs d'eau à l'étiage durant le XX<sup>e</sup> siècle issues des stations de jaugeages de Portet-sur-Garonne et Verdun-sur-Garonne mettent également en évidence une évolution qui s'explique par l'enfoncement du lit et qui semble s'initier dès le début du XX<sup>e</sup> siècle (fig. 5). Si la variabilité interannuelle des hauteurs d'étiage induit un bruit dans cette série, la tendance obéit à un contrôle géomorphologique sur la ligne d'eau. À Portet-sur-Garonne, de 1910 à 1960, l'incision est estimée approximativement à -1,3 m et à -0,7 m entre 1960-1990 soit une vitesse d'incision sensiblement équivalente sur les deux périodes avec respectivement -2,6 et -2,3 cm/an dans un secteur n'ayant pas subi d'intervention humaine majeure. Il est à noter qu'au tout début des années 1970, en raison d'un effondrement de la berge suite à l'incision du lit, l'échelle limnimétrique a été emportée et a dû être déplacée quelques centaines de mètres en amont. À Verdun-sur-Garonne, lieu d'extraction et d'endiguement durant la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les valeurs d'incision pour les mêmes périodes sont approximativement de -0,8 m et -1 m, soit des vitesses d'incision respectives de -1,6 et -3,3 cm/an.

À partir des années 1990, l'incision se poursuit localement mais cette dernière reste toutefois plus modeste voire nulle (tab. 1), notamment en raison de la fixation du profil sur le fond rocheux, apparent dans de nombreux secteurs. En effet, l'enfoncement du lit a entraîné un décapage intégral de la charge alluviale en de multiples endroits, laissant apparaître des affleurements molassiques et des seuils rocheux qui fixent les profils (Jantzi, travaux en cours). Les processus d'incision changent alors de nature et passent de l'évacuation de la charge alluviale à l'érosion du substratum. Une étude du substrat de la Garonne dans les années 2000 entre Toulouse et la retenue de Malause, a permis d'estimer la part de ces affleurements dans le chenal à 50 % environ (Delmouly et al., 2007). Ainsi, en période d'étiage, de larges affleurements rocheux de molasses, qui forment des replats

ou des seuils, apparaissent sur l'ensemble du linéaire du cours d'eau, engendrant des ressauts pouvant atteindre plusieurs mètres.

Fig. 5 – Niveau de l'eau à l'étiage aux stations de (A) Portet-sur-Garonne et (B) Verdun-sur-Garonne (source : Banque Hydro).

Fig. 5 – Water level at low stage at the gauging stations of (A) Portet-sur-Garonne and (B) Verdun-sur-Garonne (source: Banque Hydro).



La ligne grise est une moyenne mobile de 3 ans. La rupture en 1970 à Portet-sur-Garonne correspond au déplacement de l'échelle limnimétrique à la suite d'un glissement de berge lié à l'enfoncement du chenal.

The grey line is a moving average of 3 years. The break in 1970 at Portet-sur-Garonne corresponds to the displacement of the gauging station after a landslide triggered by local channel incision.

### 4.3. Forçages anthropiques

Le cours de la moyenne Garonne toulousaine est sous le contrôle de différentes activités anthropiques qui agissent d'une part à l'échelle du bassin versant avec la reforestation des versants et la construction de barrages, et à l'échelle du linéaire ou de la station avec les extractions de granulats et les aménagements du cours d'eau. Si la distinction entre les deux facteurs est facile, la séparation des effets de ces différentes actions reste plus difficile à réaliser. À l'échelle du bassin versant, le XX<sup>e</sup> siècle marque une augmentation des surfaces boisées dans les Pyrénées et le piedmont (fig. 6). Entre 1910 et 1940, l'augmentation du couvert forestier est de 20 %, pour se stabiliser entre 1940 et 1960. C'est à partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle que la croissance reprend de manière significative avec une hausse de 37 % entre 1960 et 1990, pour se stabiliser à nouveau jusqu'à aujourd'hui. À l'inverse, les surfaces labourables diminuent, notamment durant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle avec -27 %. Ces changements d'occupation du sol peuvent s'expliquer par la recolonisation spontanée de la végétation liée à la déprise agropastorale amorcée au début du XX<sup>e</sup> siècle et qui s'accélère vers le milieu du siècle d'une

part et les mesures de reboisement des versants prises par les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) pour la lutte contre l'érosion des sols d'autre part (Bartoli et Tierle, 1998 ; Métailié, 2006). Parallèlement, l'amont du bassin versant est marqué par la construction de barrages à des fins d'exploitation hydro-électrique des cours d'eau pyrénéens et de fourniture en eau (fig. 7). C'est entre 1940 et 1970 que la majorité des barrages sont mis en place. Actuellement, huit barrages existent sur la Garonne en amont de Toulouse. En raison de ces nombreux aménagements, les apports solides provenant des Pyrénées et notamment la charge grossière, sont amoindris du fait de leur piégeage, créant ainsi une discontinuité et un déficit dans le transit sédimentaire. Si la charge grossière est fortement impactée, Maneux et al. (2001) ont montré que la capacité de piégeage des barrages pour les sédiments fins est relativement faible puisqu'au niveau de Toulouse, seulement 6 % de la production sédimentaire issue de l'amont est impactée. À cela s'ajoutent les nombreux obstacles à l'écoulement présent sur la Garonne amont et ses affluents tels les seuils (Onema, Référentiel des Obstacles à l'Écoulement).

Fig. 6 – Évolution de l'occupation du sol en amont de la zone d'étude (sources : statistique forestière Mathieu, cadastre, statistique agricole et inventaire forestier national).

*Fig. 6 – Land use changes upstream from the study area (sources: forestry statistics Mathieu, cadastre, agricultural statistics and national forest inventory).*

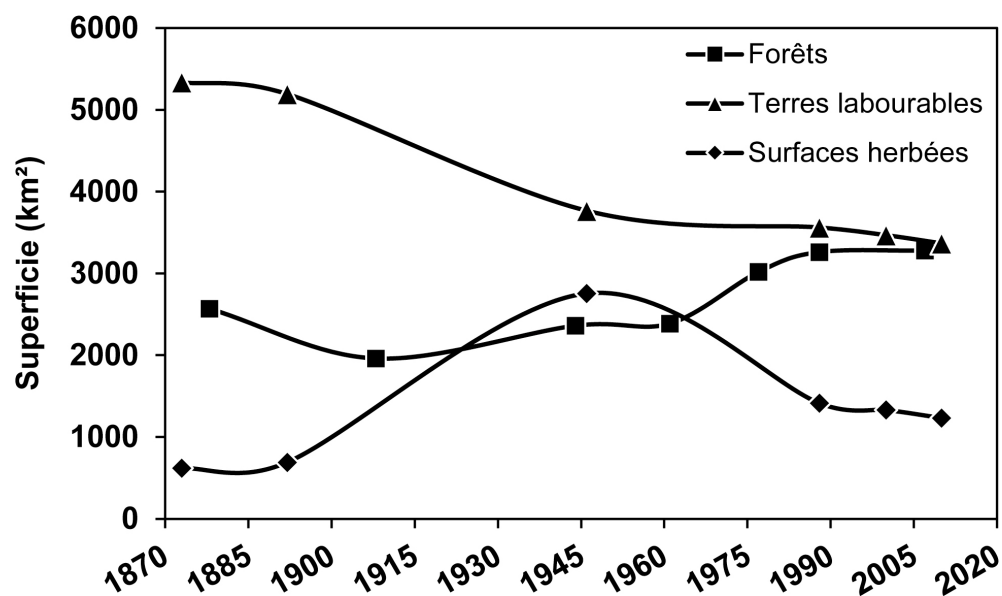
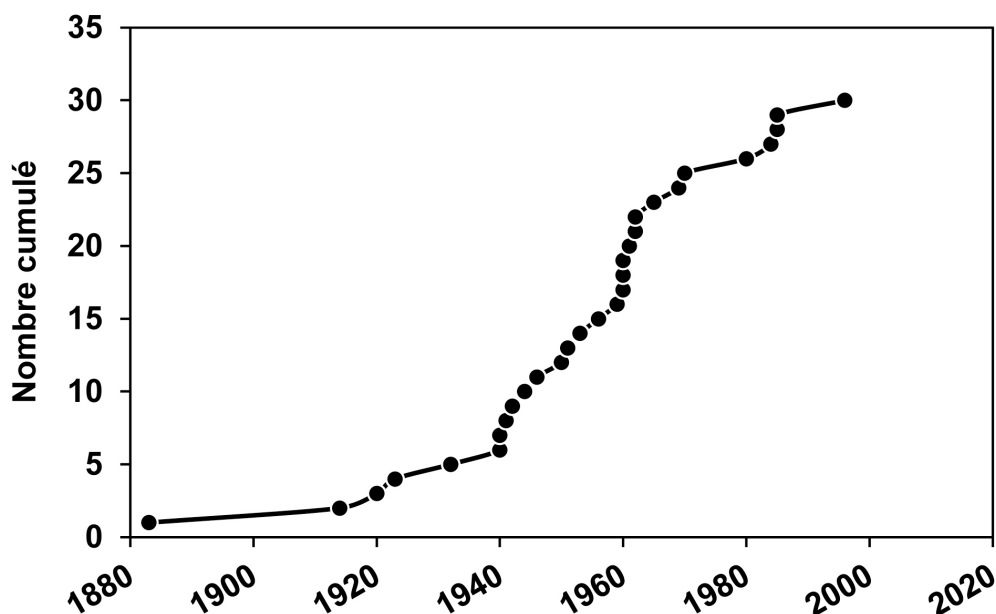


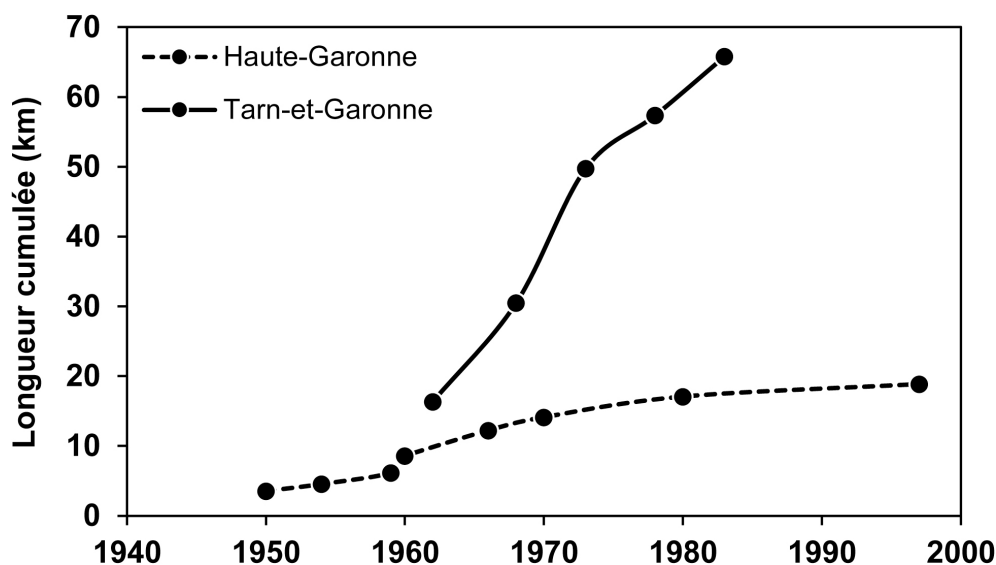
Fig. 7 – Évolution du nombre de barrages sur la Garonne et ses affluents en amont de la zone d'étude.

Fig. 7 – Evolution of the number of dams on the Garonne River and its tributaries upstream from the study area.



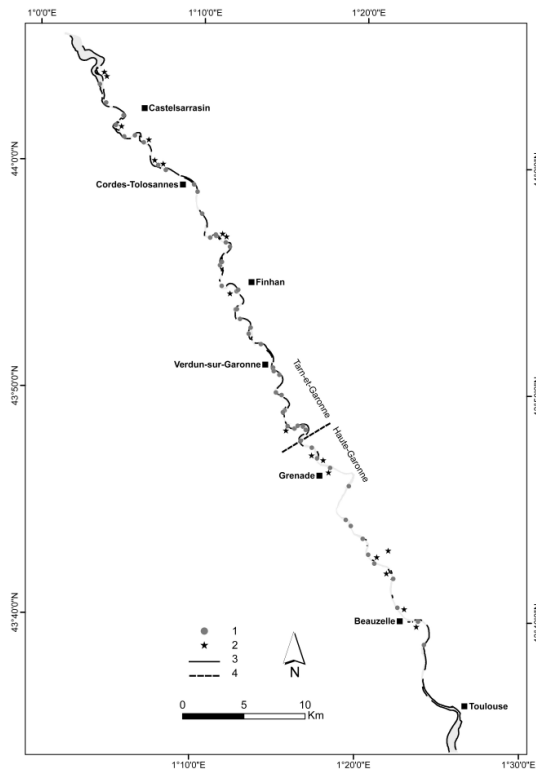
À l'échelle du cours d'eau, jusque dans les années 1950, la moyenne Garonne toulousaine se distingue par une forte instabilité de son chenal. Ce dernier a fait l'objet de plusieurs tentatives de fixation au XIX<sup>e</sup> siècle mais sans réel succès (Valette, 2002). Il s'agit d'aménagements défensifs réalisés le plus souvent au coup par coup par les riverains dans le but de protéger leur berge et de gagner du terrain sur le cours d'eau en effectuant des plantations sur les atterrissements afin de favoriser l'alluvionnement et la fixation de ces derniers. Des fermetures de chenaux secondaires par la mise en place de barrage sont également réalisées. Ces travaux sont sous le contrôle des Ponts et Chaussées afin de ne pas entraver le libre écoulement de la Garonne et garantir la navigation. Toutefois, aucun projet global d'aménagement n'est entrepris à cette période (Valette et al., 2014). Des dragages sont également réalisés pour assurer une profondeur suffisante au passage des bateaux en période d'étiage. De 1893 à 1923, ce sont environ 55000 t de matériaux qui ont été extraits. Ce n'est qu'à partir de 1960 que le cours d'eau fait l'objet d'une stabilisation systématique dans sa partie aval en Tarn-et-Garonne, avec l'aménagement de 90 ouvrages. Il s'agit de digues (23) pour la stabilisation des parties concaves, d'épis (29) pour barrer les berges et réorienter l'écoulement, de barrages (24) pour la fermeture de bras morts, et de la création de nouveaux chenaux (14) pour recouper artificiellement certains méandres où la fixation est trop coûteuse (Valette, 2002). Ces travaux se sont étalés en une succession de 14 tranches jusqu'en 1984, empêchant toute divagation ultérieure du lit. Au total, ce sont environ 66 km de berge qui sont fixés pour une longueur de cours d'eau de 50 km (fig. 8). À l'inverse dans le département de Haute-Garonne, le cours d'eau ne fait l'objet d'aucun plan de fixation des berges en dehors de Toulouse, seuls des enrochements ont été mis en place de manière localisée. Au total, 19 km de berge ont été fixés dont les trois quarts au niveau de Toulouse, pour une longueur de cours d'eau de 35 km. Cette situation peut s'expliquer par une plus faible mobilité du cours d'eau dans la partie amont, avec des ajustements latéraux évoluant lentement, ce qui n'est pas le cas dans la partie aval (David et al., 2016).

Fig. 8 – Protections de berge durant les 50 dernières années (sources : DDT 31 et 82).  
 Fig. 8 – Bank protection structures during the last 50 years (sources: DDT 31 and 82).



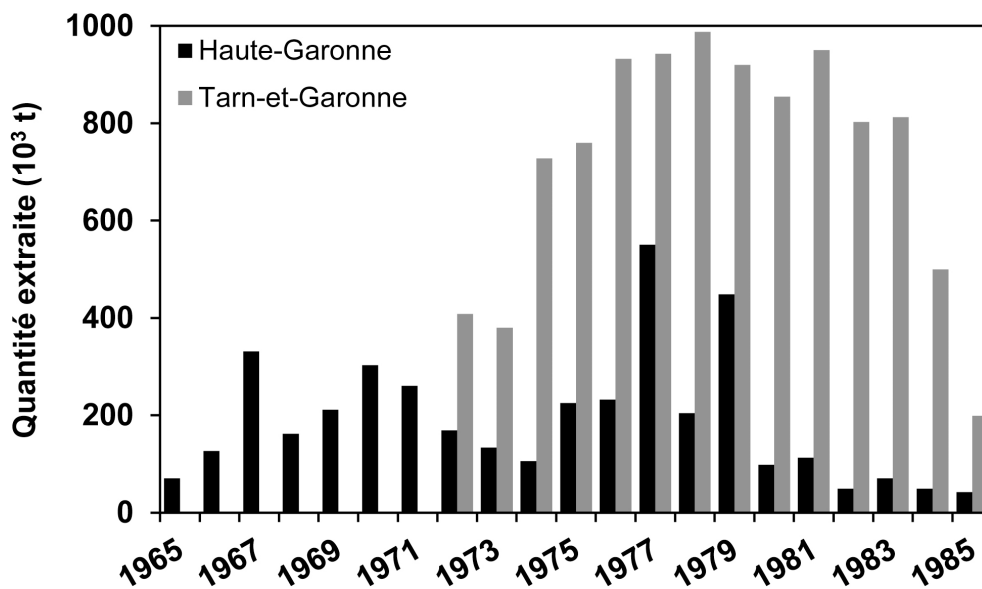
De manière concomitante à la stabilisation de la Garonne, le lit mineur devient le lieu d'une extraction intense de granulats avec une industrialisation de l'activité pour faire face au besoin grandissant de matériaux lié au développement urbain et routier (Beaudelin, 1989). Les prélèvements sont réalisés sur l'ensemble du linéaire avec une cinquantaine d'atterrissements exploités ainsi que des prélèvements dans le chenal d'écoulement (fig. 9). La répartition des exploitations et les volumes prélevés mettent en évidence une pression plus importante en Tarn-et-Garonne. Cela peut s'expliquer par un gisement alluvionnaire plus important issu des multiples divagations du lit dans ce secteur mais surtout en raison de la nécessité d'une grande quantité de matériaux pour la réalisation de grands chantiers que sont la construction de la centrale nucléaire de Golfech, de l'autoroute A62 dans le secteur de Castelsarrasin et des aménagements de stabilisation de la Garonne. Entre 1965 et 1985, la quantité de matériaux soustraits à la Garonne peut être estimée sur la base de chiffres officiels d'exploitation, issues des archives des Directions Départementales des Territoires de Haute-Garonne et du Tarn-et-Garonne, à environ 14 Mt soit environ 667 000 t/an en moyenne (fig. 10).

Fig. 9 – Localisation des atterrissements exploités entre 1960 et 1985.  
 Fig. 9 – Location of sediment mining sites between 1960 and 1985.



1. Sites d'extraction ; 2. Sites de traitement ; 3. Protections de berge ; 4. Limite départementale.  
 1. Sediment mining sites; 2. Treatment sites; 3. Bank protection structures; 4. Departmental boundary.

Fig. 10 – Quantité de granulats extraite dans le lit mineur (actualisé et modifié d'après Beaudelin, 1989).  
 Fig. 10 – Quantity of sediment mining in the minor riverbed (updated and modified from Beaudelin, 1989).

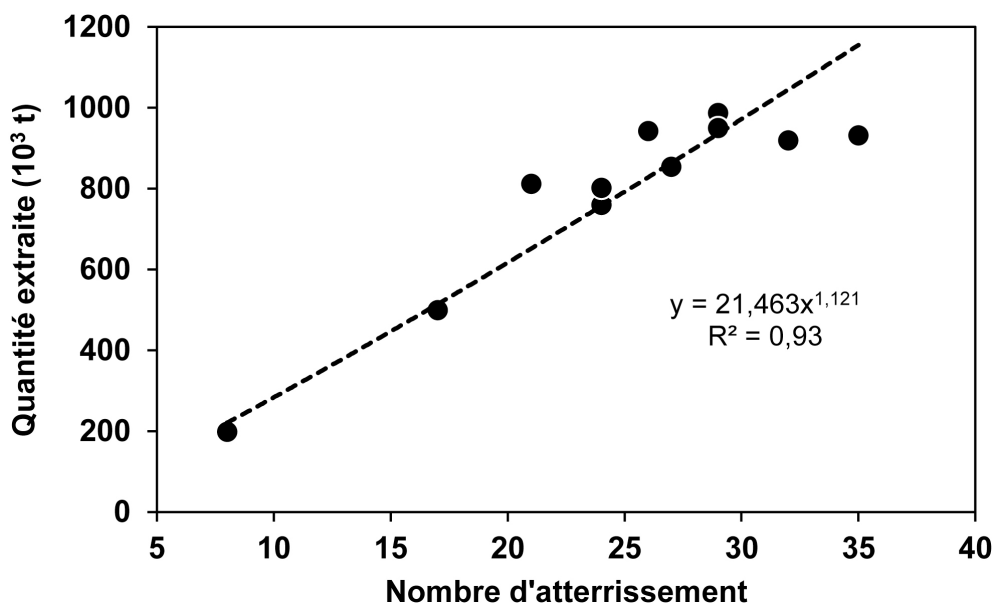


Toutefois, ces quantités sont une estimation basse en raison de lacunes dans les documents administratifs. C'est le cas par exemple des années 1960 en Tarn-et-Garonne



pour lesquelles aucun document quantifiant les extractions n'a été retrouvé. Pour pallier cette lacune, il est possible d'estimer les quantités extraites durant cette période en modélisant la relation entre le nombre de bancs en exploitation et les quantités extraites à partir des données des années 1970 et 1980. Considérant qu'il n'y a pas eu d'innovation technique majeure ni de modification des exploitants entre la période de référence et la période de lacune, il est possible de proposer une relation puissance (fig. 11). Ainsi la quantité de matériaux extraits pour les années 1960 peut être estimée à environ 6 Mt ce qui porte le total de matériaux prélevé entre 1960 et 1985 à approximativement 20 Mt.

Fig. 11 – Relation entre les quantités de granulat prélevées et le nombre d'atterrissements exploités.  
Fig. 11 – Relationship between the quantity of sediment extracted and the number of mining sites.

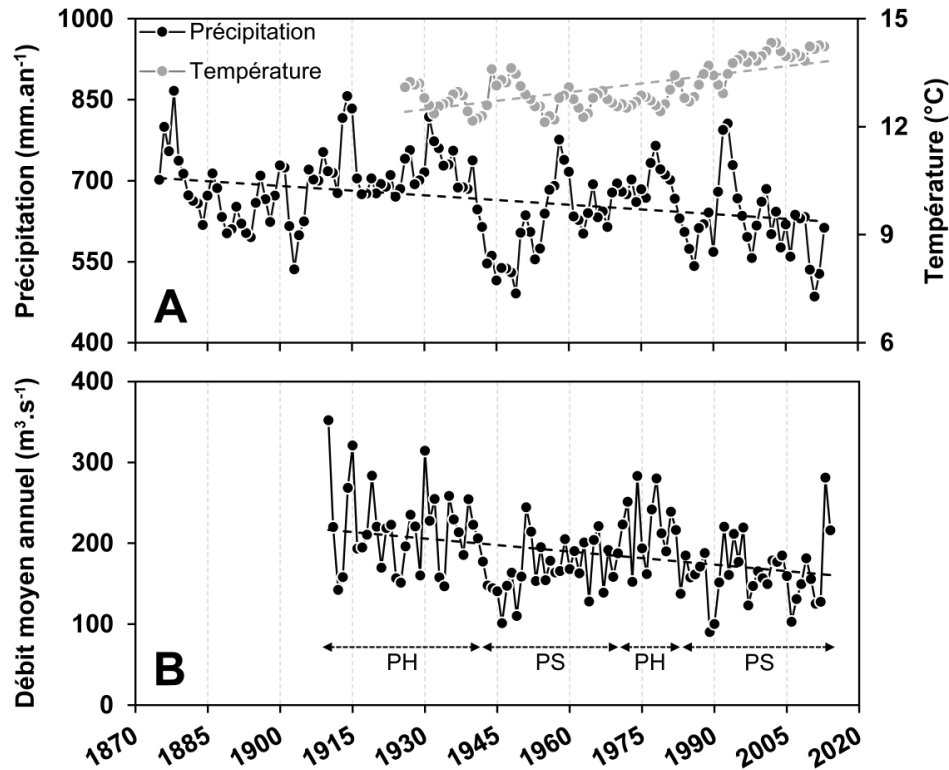


#### 4.4. Forçages hydro-climatiques

Au cours des 150 dernières années, les conditions hydro-climatiques ont fortement été modifiées depuis la fin du PAG et l'entrée dans une période de réchauffement global à partir du XX<sup>e</sup> siècle. À l'échelle du pourtour méditerranéen, Philandras et al. (2011) montre une diminution des précipitations annuelles entre 1901 et 2009 avec une accentuation du phénomène à partir de 1950. Concernant les températures, le sud-ouest de la France au cours du XX<sup>e</sup> siècle présente un accroissement d'environ +1°C en moyenne et une accélération du réchauffement à partir des années 1980 ainsi qu'une accentuation de la sécheresse (Mestre, 2000 ; Moisselin et al., 2002). Plus localement à Toulouse, l'évolution des précipitations et des températures concorde avec la tendance hydro-climatique observée à l'échelle régionale depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle (fig. 12A). Si les précipitations entre 1870 et 2010 montrent globalement une diminution, une alternance de période à la dynamique pluviométrique contrastée est observée. En effet, plusieurs périodes caractérisées par une activité pluviométrique modérée se distinguent : c'est le cas de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et des périodes 1940-1955 et 1985-2016.

Fig. 12 – Évolution des précipitations et des températures depuis 150 ans à Toulouse (A) et des débits moyens annuels enregistrés à la station de Portet-sur-Garonne en amont de Toulouse (B) (sources : Météo France et Banque Hydro).

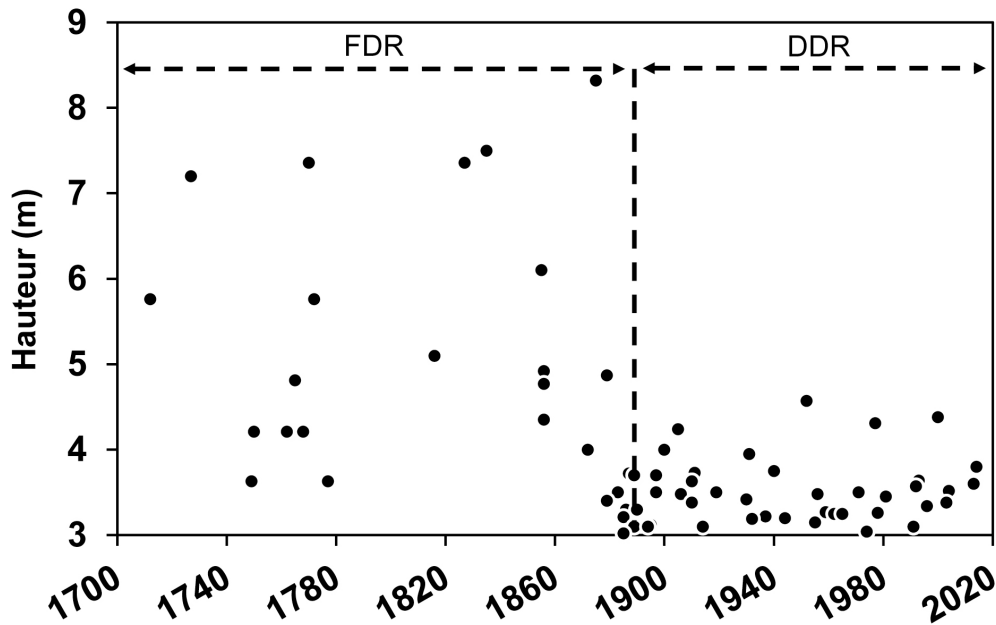
*Fig. 12 – Rainfall and temperature changes over the last 150 years in Toulouse (A) and mean annual discharge recorded at Portet-sur-Garonne gauging station upstream from Toulouse (B) (sources: Météo France and Banque Hydro).*



La tendance est estimée par régression linéaire. PH. Période humide ; PS. Période sèche.  
 The trend is estimated by linear regression. PH. Wet period; PS. Dry period.

Parallèlement à la diminution globale des précipitations, la Garonne a vu sa dynamique hydrologique se modifier (Lalanne-Bertoudicq et al., 1989). La chronique des hauteurs de crue mesurées à Toulouse depuis 1700 montre une rupture significative de l'intensité et de la fréquence des crues vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (fig. 13). Cette rupture coïncide avec la fin du PAG, période qui correspond généralement à une forte activité hydro-sédimentaire des cours d'eau. Depuis la crue de référence de 1875, pour laquelle la hauteur a été de 8,3 m à Toulouse pour un débit estimé de 7 170 m<sup>3</sup>/s, aucune crue n'a dépassé une hauteur de 5 m, la plus importante au cours du XX<sup>e</sup> siècle étant celle de 1952 avec une hauteur de 4,6 m pour un débit estimé de 4 300 m<sup>3</sup>/s. Les débits moyens annuels enregistrés à la station de Portet-sur-Garonne depuis 1910 indiquent également une diminution globale des débits durant le XX<sup>e</sup> siècle (fig. 12B).

Fig. 13 – Hauteurs d'eau des principales crues enregistrées à Toulouse (source : Banque Hydro).  
Fig. 13 – Water level of the main floods recorded at Toulouse (source: Banque Hydro).

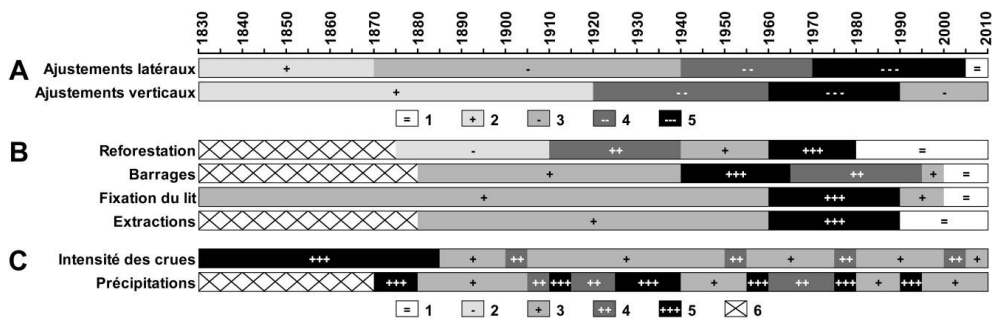


FDR. Régime dominé par les crues ; DDR. Régime dominé par les étiages (Erskine et Warner, 1998).  
FDR. Flood dominated regime; DDR. Drought dominated regime (Erskine et Warner, 1998).

## 5. Discussion

L'analyse des changements morphologiques de la moyenne Garonne toulousaine depuis 1830 à nos jours a permis de mettre en évidence trois périodes principales d'ajustements dont les contextes ont pu être appréhendés grâce à l'étude des facteurs hydro-climatiques et anthropiques. L'évolution morphologique et les forçages associés ont été synthétisés schématiquement, comme le montre la Figure 14.

Fig. 14 – Évolution simplifiée des ajustements morphologiques de la moyenne Garonne toulousaine et des facteurs de contrôle associés.  
Fig. 14 – Simplified evolution of the morphological adjustments of the middle Garonne River and controlling factors.



A. Ajustements du chenal. 1. Stable ; 2. Aggradation/élargissement ; 3. Incision/contraction faible ; 4. Incision/contraction modérée ; 5. Incision/contraction élevée. B et C. Forçages anthropiques et hydro-climatiques. 1. Stable ; 2. Négatif ; 3. Faible ; 4. Modéré ; 5. Elevé ; 6. Sans donnée.  
A. Channel adjustments. 1. Stable; 2. Aggradation/widening; 3. Incision/narrowing low; 4. Incision/narrowing moderate; 5. Incision/narrowing high. B and C. Human activity and hydro-climatic factors. 1. Stable; 2. Negative; 3. Low; 4. Moderate; 5. High; 6. No data.

Durant le XIX<sup>e</sup> siècle et le début du XX<sup>e</sup> siècle, deux phases peuvent être identifiées. La première phase, de 1830 aux années 1860, est caractérisée par une aggradation et un élargissement du lit tandis que la seconde phase, des années 1860 à 1920, se distingue par un lit toujours en aggradation mais qui commence à se contracter. Cette période correspondant à la fin du PAG, s'inscrit dans un contexte général de forte activité hydro-sédimentaire des cours d'eau avec l'occurrence de fortes crues, se traduisant généralement par un élargissement et une aggradation de ces derniers dans les zones de montagne et de piedmont (Bravard et al., 1997). Dans les Pyrénées, l'analyse historique des inondations depuis 1500 met en évidence un regain des événements extrêmes entre 1750-1780 et 1850-1910 (Antoine, 2009). Cela se traduit sur la moyenne Garonne toulousaine par des crues majeures fréquentes jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle dont le paroxysme est la crue du 23 juin 1875 (fig. 12). Le transit sédimentaire, exacerbé par l'activité hydrologique intense au cours de la période, est renforcé par la déstabilisation des versants sous l'effet du déboisement et de l'activité agro-pastorale, favorisant l'érosion des sols et les apports sédimentaires (Bartoli et Tierle, 1998 ; Métailié, 2006). À l'échelle du linéaire, les tentatives de fixation du lit ont une efficacité limitée face à une Garonne très instable. De plus, la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle marque un recul de l'intérêt pour l'aménagement de la rivière en raison de l'abandon de la navigation au profit du chemin de fer et du canal latéral (Gazelle et Valette, 2000). À partir de 1860, les services de l'État n'interviennent plus et la Garonne à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle sera décrite par les ingénieurs comme libre de tout ouvrage de protection des berges (Gazelle et Valette, 2000). Les ajustements morphologiques observés durant cette période sont donc liés semble-t-il, en premier lieu au contexte hydro-climatique auquel vient s'ajouter l'exploitation des versants en amont du bassin versant, mais la quantification de la part respective de chaque facteur reste difficile.

Cependant, la contraction du chenal, qui aurait débutée à partir de 1868 alors même que ce dernier poursuit son aggradation, pose question à propos du décalage temporel important entre les deux phénomènes. L'absence de données entre 1868 et les années 1940 ne permettant pas d'affiner la chronologie du processus de contraction, la période voyant débiter le phénomène reste incertaine. Il est possible d'envisager que la contraction apparaisse plus tardivement, voire de manière concomitante avec l'incision du chenal observée au début du XX<sup>e</sup> siècle. En effet, l'activité hydrologique encore importante à cette période, ainsi que le net changement d'occupation du sol, qui n'intervient que vers le début du XX<sup>e</sup> siècle avec l'augmentation du couvert forestier et des surfaces herbacées au détriment des terres labourables (fig. 6), peuvent le laisser penser. De plus, l'éloignement de la moyenne Garonne par rapport aux sources sédimentaires des Pyrénées, implique un temps de latence dans la réponse du cours d'eau face aux effets de la fin du PAG et du reboisement des versants, ce qui se traduit dans la chronologie de l'incision du chenal.

L'influence prépondérante des facteurs hydro-climatiques durant cette période a également été mis en avant en Italie sur plusieurs rivières du sud (Scorpio et al., 2015) et du nord avec l'Ahr (Campana et al., 2014), pour lesquelles les ajustements du chenal sont principalement guidés par la dynamique hydro-sédimentaire des versants et la fourniture abondante de matériaux liées à la dernière phase du PAG, l'impact des activités humaines étant considéré comme faible. En France, il en est de même avec l'Ardèche où le XIX<sup>e</sup> siècle se caractérise par une aggradation du chenal de l'ordre de 1 à 2 m (Gob et al., 2008). Sur la moyenne Durance, pour laquelle le climat représente le principal facteur de son

évolution, le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle montre une tendance à l'exhaussement du chenal avec une inversion du phénomène ainsi qu'une contraction à partir de la fin du siècle (Miramont et al., 1998).

La troisième phase, de 1920 à nos jours, voit la moyenne Garonne entrer dans une phase d'incision conjuguée à une contraction du chenal. Avec la sortie du PAG, le XX<sup>e</sup> siècle s'inscrit dans un contexte de calme hydrologique avec une rupture nette dans l'intensité et la fréquence des grands événements (fig. 11). De manière concomitante, l'occupation du sol à l'échelle du bassin versant se modifie significativement avec l'augmentation du couvert forestier et la diminution des terres labourables sous l'impulsion des reboisements réalisés par les services RTM (Bartoli et Tierle, 1998) et la recolonisation spontanée de la végétation liée à la déprise agro-pastorale (Gibon et Balent, 2005). C'est également une période qui voit se mettre en place les premiers barrages pyrénéens (fig. 7). Ces interventions, couplées à une réduction naturelle de la dynamique hydrologique, entraînent une diminution des apports sédimentaires et une discontinuité dans le transit amont-aval. Cependant, il est difficile de déterminer le rôle respectif de chaque facteur dans les ajustements du chenal.

À partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, une rupture nette apparaît avec l'accélération des phénomènes d'incision et de contraction, sous l'effet principal d'interventions anthropiques directement dans le lit mineur. Entre 1960 et 1984, la moyenne Garonne fait l'objet d'une fixation généralisée des berges dans la partie Tarn-et-Garonne (fig. 8), entraînant une contraction importante dans ce secteur et empêchant toute mobilité et apport sédimentaire par érosion latérale sur près de 70 km de berge. Cette artificialisation des berges et sa conséquence sur la recharge sédimentaire a également été observée sur la Drôme pour laquelle seuls 25 % du linéaire contribuent aux apports latéraux (Landon et al., 1998). En parallèle, des extractions intensives de granulats ont lieu sur l'ensemble du cours d'eau de 1960 à la fin des années 1980 (Beaudelin, 1989). De par son ampleur et sa concomitance avec la nette accélération de l'incision, cette activité peut être identifiée comme le principal facteur d'enfoncement du lit, les travaux de fixation ne venant que renforcer cette dynamique de dégradation. Rapportée à la surface du lit mineur et en prenant une densité moyenne de 2, la contribution des prélèvements de granulats représente une épaisseur décapée moyenne d'environ 0,8 m. Comparé à l'incision moyenne de 1 m observée durant cette période, les extractions contribuent à elles seules à au moins 80 % du phénomène, mettant clairement en évidence leur rôle majeur. Sur le Piave dans le nord-est de l'Italie où l'incision est d'environ 1 m, il en est de même avec des extractions représentant près de 70 % de l'enfoncement de la rivière (Comiti et al., 2011). Sur la Loire, les interventions en lit mineur, dont les extractions, ont entraîné un enfoncement de près de 2 m au niveau de Tours, contribuant ainsi à l'effondrement du pont Wilson en 1978 (Gasowski, 1994).

Ces interventions en lit mineur ont sans conteste favorisé le phénomène de chenalisation de la Garonne dans un contexte de tarissement des apports sédimentaires venant de l'amont et lié aux causes vues précédemment. Sur la Loire amont, Crepet (2000) met en évidence des causes similaires dans l'évolution du cours d'eau qui, depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, a vu son chenal se contracter et s'enfoncer de 1 m en moyenne. Il en est de même dans les Préalpes du sud, sur les affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion, où Liébault et Taillefumier (2000) ont mis en évidence une rupture importante dans la contraction de la bande active à partir de 1950 ainsi qu'une incision dont l'origine serait en partie liée aux extractions de granulats auxquels viendrait s'ajouter le tarissement des

sources sédimentaires lié au reboisement et aux travaux RTM. Dans la partie aval de la Drôme, l'incision moyenne entre 1928 et 1986 est estimée à 1,7 m (Landon et Piégay, 1994). La Grande Saône, représente également un cas marquant de l'impact des aménagements à des fins de navigation et des nombreux dragages qui ont eu lieu depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, entraînant ainsi une modification profonde du profil en long avec un enfouissement moyen de 4,5 m (Astrade et Dumond, 2000).

À partir des années 1990, alors que les extractions ont cessé et que le lit se trouve définitivement fixé, la largeur du chenal se stabilise tandis que l'incision se poursuit localement mais reste toutefois plus modeste voire nulle notamment en raison de la fixation plus ou moins durable du profil en long sur le fond rocheux et de la limitation de l'érosion régressive par les seuils rocheux. Cette stabilisation se retrouve également sur des cours d'eau italiens pour lesquels les années 1990 marquent même un début de reprise de l'élargissement et de l'aggradation des chenaux et qui serait initié en premier lieu par l'arrêt des extractions (Comiti et al., 2011 ; Ziliani et Surian, 2012 ; Bollati et al., 2014 ; Campana et al., 2014 ; Scorpio et al., 2015). Cependant, dans le cas de la Garonne, qui présente un fort déficit sédimentaire sans possibilité de recharge suffisante, aucune dynamique d'élargissement ou d'aggradation ne peut être envisagée en l'état. En effet, en de nombreux secteurs la charge alluviale a été complètement décapée, laissant apparaître un fond rocheux molassique qui représente environ 50 % du lit mineur (Delmouly et al., 2007).

Parallèlement aux ajustements latéraux et verticaux mis en évidence depuis les années 1830, une simplification et une homogénéisation des formes fluviales ont été mises en évidence par David et al. (2016). Si, de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle au début du XX<sup>e</sup> siècle, quatre modes de fonctionnements hydro-sédimentaires sont identifiés allant du chenal unique et sinueux stable au chenal à bras multiples et sinueux instable, aujourd'hui seul le fonctionnement en chenal unique et sinueux stable subsiste. Pour ces mêmes auteurs, cette transition entre mode de fonctionnement s'est effectuée selon trois processus : l'évacuation et la végétalisation des bancs, l'érosion et le rattachement des îles aux berges et la stabilisation du chenal selon une progression dans le temps de l'amont vers l'aval. Cette simplification des formes fluviales a également été mise en évidence sur d'autres cours d'eaux. C'est le cas par exemple de l'Ahr avec le passage d'un système fluvial anastomosé à un chenal unique au cours des 150 dernières années (Campana et al., 2014). En France, sur l'Ain, une métamorphose fluviale s'est opérée au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle sous l'influence d'interventions anthropiques, avec le passage d'un cours d'eau en tresse à un style à chenal unique méandriforme (Marston et al., 1995).

## 6. Conclusion

L'analyse des sources cartographiques et topographiques anciennes a permis de retracer l'évolution latérale et verticale de la moyenne Garonne toulousaine depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle et d'en proposer une périodisation. Couplée à l'étude de sources historiques concernant l'activité hydro-climatique et anthropique au cours des deux derniers siècles, il a été possible de mettre en évidence les forçages initiateurs de ces ajustements morphologiques.

Ce travail a mis en évidence trois grandes phases d'ajustements : (i) de 1830 aux années 1860, le chenal s'exhausse et la bande active s'élargit ; (ii) des années 1860 à 1920, le chenal est toujours à l'aggradation tandis que la bande active entame une phase de

contraction ; (iii) enfin depuis 1920 jusqu'à aujourd'hui, le chenal s'incise et la contraction de la bande active se poursuit. Si l'évolution observée durant le XIX<sup>e</sup> siècle - début XX<sup>e</sup> siècle semble d'abord guidée par les conditions hydro-sédimentaires favorables liées à la phase finale du PAG, la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle marque clairement le rôle majeur des interventions anthropiques dans la contraction et l'incision du chenal. À l'instar de nombreux cours d'eau, l'extraction de granulats sur la Garonne a été identifiée comme la principale cause de l'incision à cette période, les travaux de chenalisation et la réduction des apports sédimentaire ne jouant qu'un rôle secondaire. Cette incision a entraîné en de nombreux endroits un décapage complet de la charge alluviale laissant apparaître fréquemment des affleurements molassiques. Ainsi, en période d'étiage, des seuils rocheux apparaissent le long du cours d'eau avec des ressauts pouvant atteindre plusieurs mètres. À ce jour, ces derniers n'ont pas fait l'objet d'une analyse. La question de la pérennité des seuils rocheux comme forme de fixation de l'évolution du lit reste donc un point important de l'évolution du profil en long encore à explorer.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- Antoine J.-M. (2009)** – L'histoire du climat par ses extrêmes. Sources géo-historiques et inondations dans les Pyrénées depuis le Petit Age Glaciaire. *Archéologie du Midi Médiéval*, 27, 143-155.  
DOI : 10.3406/amime.2009.1893
- Astrade L., Dumond A. (2000)** – L'évolution du profil en long d'un cours d'eau navigable sous l'effet des aménagements, la Grande Saône du début du XIX<sup>e</sup> s. à aujourd'hui. *Géocarrefour*, 75 (4), 317-326.  
DOI : 10.3406/geoca.2000.2483
- Bartoli M., Tierle G. (1998)** – Dynamiques et usages des espaces forestiers montagnards : l'exemple des Pyrénées françaises. *Revue forestière française*, 50, 37-45.  
DOI : 10.4267/2042/5581
- Beaudelin P. (1989)** – Conséquences de l'exploitation des granulats dans la Garonne. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 60 (4), 603-616.  
DOI : 10.3406/rgpso.1989.3182
- Bollati I.M., Pellegrini L., Rinaldi M., Duci G., Pelfini M. (2014)** – Reach-scale morphological adjustments and stages of channel evolution: The case of the Trebbia River (northern Italy). *Geomorphology*, 221, 176-186.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2014.06.007
- Bravard J.-P., Amoros C., Pautou G., Bornette G., Bournaud M., Châtelliers M.C. des, Gibert J., Peiry J.-L., Perrin J.-F., Tachet H. (1997)** – River Incision in South-East France: Morphological Phenomena and Ecological Effects. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13, 75-90.  
DOI : 10.1002/(SICI)1099-1646(199701)13:1<75::AID-RRR444>3.0.CO;2-6

**Bravard J.-P. (1989)** – La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Age et à l'Epoque Moderne. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 25, 145-157.

**Campana D., Marchese E., Theule J.I., Comiti F. (2014)** – Channel degradation and restoration of an Alpine river and related morphological changes. Geomorphology, 221, 230-241.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2014.06.016

**Cinotti B. (1996)** – Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. Revue forestière française, 48 (6), 547-562.  
DOI : 10.4267/2042/26776

**Comiti F., Da Canal M., Surian N., Mao L., Picco L., Lenzi M.A. (2011)** – Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. Geomorphology, 125, 147-159.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2010.09.011

**Crepet F. (2000)** – Impact des aménagements hydrauliques sur le régime et la dynamique de la Loire amont. Implications pour la gestion du fleuve. Géocarrefour, 75 (4), 365-374.  
DOI : 10.3406/geoca.2000.2487

**David M. (2016)** – Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène : trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90 km). Thèse de doctorat, Université Toulouse II Jean Jaurès, 288 p.

**David M., Labenne A., Carozza J.-M., Valette P. (2016)** – Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: Contribution of mixed multiple factor analysis (MFAMix). Geomorphology, 258, 21-39.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.01.012

**Décamps H., Fortuné M., Gazelle F., Pautou G. (1988)** – Historical influence of man on the riparian dynamics of a fluvial landscape. Landscape Ecology, 1 (3), 163-173.  
DOI : 10.1007/BF00162742

**Delmouly L., Moreau N., Croze N., Le Barthe R. (2007)** – Cartographie du substrat de la Garonne (De la retenue de St-Nicolas-De-La-Grave à Toulouse) et influence sur le comportement de saumons atlantiques en remontée. Rapport du Groupe d'Hydraulique Appliquée aux Aménagements Piscicoles et à la Protection de l'Environnement, RA07.05, 111 p.

**Erskine W.D., Warner R.F. (1998)** – Further assessment of flood and drought-dominated regimes in south-eastern Australia. Australian Geographer, 29 (2), 257-261.  
DOI : 10.1080/00049189808703218

**Gautier E. (1994)** – Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine - L'exemple du Buëch (Alpes du sud). Revue de Géographie de Lyon, 69, 57-62.  
DOI : 10.3406/geoca.1994.4238

**Gasowski Z. (1994)** – L'enfoncement du lit de la Loire. Revue de géographie de Lyon, 69 (1), 41-45.  
DOI : 10.3406/geoca.1994.4236

**Gazelle F., Valette P. (2000)** – L'impact des sociétés du XVIII<sup>e</sup> et du XIX<sup>e</sup> siècle sur les paysages garonnais. Géocarrefour, 75, 337-345.  
DOI : 10.3406/geoca.2000.2485



**Gibon A., Balent G. (2005)** – Landscapes on the French side of the western and central Pyrenees. In Pinto-Correia T., Bunce R.G.H., Howard D.C. (Eds.): Landscape Ecology and Management of Atlantic Mountains, IALE, 65-73.

**Gob F., Jacob N., Bravard J.-P., Petit F. (2008)** – The value of lichenometry and historical archives in assessing the incision of submediterranean rivers from the Little Ice Age in the Ardèche and upper Loire (France). *Geomorphology*, 94, 170-183.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2007.05.005

**Harlé E. (1895)** – Observations sur les alluvions de la Garonne dans la région de Toulouse. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 23, 490-503.

**Koerner W., Cinotti B., Hussy J.H., Benoît M. (2000)** – Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle : identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue forestière française*, 52 (3), 249-269.  
DOI : 10.4267/2042/5359

**Kondolf G. (1997)** – Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21 (4), 533-551.  
DOI : 10.1007/s002679900048

**Lalanne-Bertoudicq G., Lambert R., Plus B., Cognet J. (1989)** – Monographie des crues de la Garonne : du Pont du Roy au Bec d'Ambès. S.M.E.P.A.G., Toulouse, 168 p.

**Lambert R. (1989)** – Cartographie géomorphologique de la vallée de la Garonne. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 60 (4), 637-648.  
DOI : 10.3406/rgpso.1989.3187

**Landon N., Piégay H. (1994)** – L'incision d'affluents méditerranéens du Rhône : la Drôme et l'Ardèche. *Revue de Géographie de Lyon*, 69, 63-72.  
DOI : 10.3406/geoca.1994.4239

**Landon N., Piégay H., Bravard J.-P. (1998)** – The Drôme river incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43, 119-131.  
DOI : 10.1016/S0169-2046(98)00046-2

**Larnier K. (2010)** – Modélisation thermohydraulique d'un tronçon de Garonne en lien avec l'habitat piscicole - approches statistique et déterministe. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 224 p.

**Liébault F., Taillefumier F. (2000)** – L'évolution contemporaine de la bande active des principaux affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion (Préalpes du Sud, France). *Géocarrefour*, 75 (4), 327-336.  
DOI : 10.3406/geoca.2000.2484

**Liébault F., Piégay H. (2002)** – Causes of 20<sup>th</sup> century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface and Processes Landforms*, 27, 425-444.  
DOI : 10.1002/esp.328

**Maneux E., Probst J.L., Veyssy E., Etcheber H. (2001)** – Assessment of dam trapping efficiency from water residence time: Application to fluvial sediment transport in the Adour, Dordogne, and Garonne River Basins (France). *Water Resources Research*, 37 (3), 801-811.  
DOI : 10.1029/2000WR900195

**Marston R.A., Girel J., Pautou G., Piégay H., Bravard J.-P., Arneson C. (1995)** – Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France.

Geomorphology, 13 (1-4), 121-131.  
DOI : 10.1016/0169-555X(95)00066-E

**Martín-Vide J.P., Ferrer-Boix C., Ollero A. (2010)** – Incision due to gravel mining: Modeling a case study from the Gállego River, Spain. *Geomorphology*, 117, 261-271.  
DOI : 10.1016/j.geomorph.2009.01.019

**Mestre O. (2000)** – Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 233 p.

**Mathieu A. (1878)** – Statistique Forestière. Ministère de l'Agriculture et du commerce. Administration des forêts. Imprimerie Nationale, Paris.

**Métailié J.-P. (2006)** – La « dégradation des montagnes » au XIX<sup>e</sup> siècle dans les Pyrénées. In Beck C., Lunginbühl Y., Muxart T. (Eds.): Temps et espaces des crises de l'environnement : sociétés et ressources renouvelables. QUAE (Ed.), 191-210.

**Miramont C., Jorda M., Pichard G. (1998)** – Evolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la moyenne Durance (France du Sud-Est). *Géographie physique et Quaternaire* 52, 3, 381-392.  
DOI : 10.7202/004855ar

**Moisselin J.-M., Schneider M., Canellas C., Mestre O. (2002)** – Les changements climatiques en France au XX<sup>e</sup> siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, 38, 45-56.  
DOI : 10.4267/2042/36233

**Peiry J.-L., Salvador P.-G., Nouguier F. (1994)** – L'incision des rivières dans les Alpes du nord : état de la question / River incision in the Northern French Alps. *Revue de Géographie de Lyon*, 69 (1), 47-56.  
DOI : 10.3406/geoca.1994.4237

**Philandras C.M., Nastos P.T., Kapsomenakis J., Douvis K.C., Tselioudis G., Zerefos C.S. (2011)** – Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 3235-3250.  
DOI : 10.5194/nhess-11-3235-2011

**Piégay H., Peiry J.-L. (1997)** – Long Profile Evolution of a Mountain Stream in Relation to Gravel Load Management: Example of the Middle Giffre River (French Alps). *Environmental Management*, 21 (6), 909-919.  
DOI : 10.1007/s002679900076

**Piégay H., Walling D.E., Landon N., He Q., Liébault F., Petiot R. (2004)** – Contemporary changes in sediment yield in an alpine mountain basin due to afforestation (the upper Drôme in France). *Catena*, 55, 183-212.  
DOI : 10.1016/S0341-8162(03)00118-8

**Piégay H., Alber A., Slater L., Bourdin L. (2009)** – Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Science*, 71, 371-388.  
DOI : 10.1007/s00027-009-9220-4

**Rinaldi M., Wyzga B., Surian N. (2005)** – Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21, 805-828.  
DOI : 10.1002/rra.884

**Rousseau P. (1990)** – L'évolution des forêts françaises métropolitaines d'après les statistiques forestières. *Revue forestière française*, 42 (1), 56-68.

DOI : 10.4267/2042/26042

**Scorpio V., Aucelli P.P.C., Giano S.I., Pisano L., Robustelli G., Roskopf C.M., Schiattarella M. (2015)** – River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery. *Geomorphology*, 251, 77-90.

DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.07.008

**Simeoni-Sauvage S. (1999)** – Modélisation hydrobiogéochimique de la Garonne à l'étiage estival : cas de l'azote entre Toulouse et Agen (120 km). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 127 p.

**Simon A. (1992)** – Energy, time, and channel evolution in catastrophically disturbed fluvial systems. *Geomorphology*, 5, 345-372.

DOI : 10.1016/0169-555X(92)90013-E

**Steiger J., Gazelle F. (1994)** – Evolution contemporaine d'un paysage fluvial sous l'effet de la dynamique des crues et des impacts humains. *Crues et Inondations, congrès de la Société Hydrotechnique de France, 23ème Journée de l'Hydraulique*, 289-296.

**Steiger J., James M., Gazelle F. (1998)** – Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne River, SW France. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14, 13-23.

DOI : 10.1002/(SICI)1099-1646(199801/02)14:1<13::AID-RRR473>3.0.CO;2-B

**Steiger J., Corenblit D., Vervier P. (2000)** – Les ajustements morphologiques contemporains du lit mineur de la Garonne (France) et leurs effets sur l'hydrosystème fluvial. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 122, 227-246.

**Surian N., Rinaldi M. (2003)** – Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50, 307-326.

DOI : 10.1016/S0169-555X(02)00219-2

**Surian N., Cisotto A. (2007)** – Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1641-1656.

DOI : 10.1002/esp.1591

**Valette P. (2002)** – Les paysages de la Garonne : les métamorphoses d'un fleuve (entre Toulouse et Castets-en Dordogne). Thèse de doctorat, Université Toulouse II Le Mirail, 554 p.

**Valette P., Carozza J.-M., Salles D., David M., Simonet G. (2014)** – Construction géohistorique du « sauvage » de la Garonne toulousaine : quelle part de naturalité dans les paysages fluviaux ? *Développement Durable & Territoires*, 5 (3), 1-22.

DOI : 10.4000/developpementdurable.10628

**Ziliani L., Surian N. (2012)** – Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river. *Geomorphology*, 173-174, 104-117.

DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.06.001

## ANNEXES

## Abridged English version

Over the last 200 years, significant morphological channel adjustments have been observed in many European rivers. These changes are associated with a decrease of fluvial dynamics that occurred under the effect of the end of the Little Ice Age (LIA) and human activities at the basin and channel scales. Several studies have shown that an intense degradation phase took place during the 20<sup>th</sup> century, with a tendency to channel narrowing and incision (Gautier, 1994; Bravard et al., 1997; Landon et al., 1998; Surian and Cisotto, 2007; Comiti et al., 2011; Ziliani and Surian, 2012; Campana et al., 2014; Scorpio et al., 2015). It occurred especially during the second half of the century as a consequence of intensive human interventions, such as in-stream mining, channel works and dam construction.

As many European rivers, the Garonne River has significantly changed its morphology and hydro-sedimentary dynamics during the 20<sup>th</sup> century resulting in narrowing and incision of its river bed. The morphological adjustments, especially increased from the 1950s onwards, are results of a strong increase of human interventions with an intensification of in-stream mining in almost the entire channel (Beaudelin, 1989) and heavy bank protections to stabilize the river (Valette et al., 2014). During this time, the channel was significantly incised, leading to a simplification of the fluvial mosaic and a degradation of the hydro-morphological and ecological functioning (Décamps et al., 1988; Steiger et al., 1998, 2000). This last process involved two phases: firstly, the coarse bedload was evacuated by scouring, secondly, an incision of the bedrock following the evacuation of the sediments. In many places the sediments have been completely evacuated and revealed a molassic bedrock representing about 50% of the substrate of the minor riverbed (Delmouly et al., 2007). The channel incision is described since the early 1980s (Lambert, 1989; Beaudelin, 1989; Steiger et al., 1998, 2000), but its causes (hydro-climatic vs anthropogenic), weight, and spatial variability remain under discussion. Therefore, it is difficult to put into perspective the possible specificity of this period, and to quantify the importance of this break, in the functioning of the Garonne River over longer temporal scales.

The objective of this work is to analyze the evolution of the vertical and lateral adjustments of the Toulouse middle Garonne along a linear distance of about 90 km between Toulouse and the confluence of the Tarn River (fig. 1). The period considered covers the last 200 years, between 1830 and 2000s. Our specific goals include: (i) identifying a periodization of the morphological adjustments; (ii) quantifying the intensity of the adjustments; (iii) highlighting the role of the hydro-climatic and anthropogenic factors. To achieve these, we use existing cartographic and topographic data, and historical documentation.

The results show the existence of three major phases of adjustments: (i) from 1830 to 1860s, the channel is characterized by aggradation and widening; (ii) from 1860s to 1920, the channel is still in aggradation but begins a phase of narrowing; and (iii) since 1920 until today, the channel incises and the narrowing continues (fig. 2, 4, tab. 1). The evolution observed during the 19<sup>th</sup> century - early 20<sup>th</sup> century (phase one and two) can be attributed mainly to the hydro-climatic conditions linked to the final phase of the LIA (fig. 12). This situation is reinforced by the important sedimentary supply from deforestation of hillslopes and agro-pastoral activity. During this period, human activities

in the channel seem to play only a minor role. At the beginning of the 20<sup>th</sup> century, the hydro-sedimentary activity decreases significantly with the end of the LIA, while the anthropogenic pressure evolves at the catchment scale due to the reforestation of the hillslopes (fig. 6) and the construction of the first dams (fig. 7). From the second half of the 20<sup>th</sup> century, the processes of incision and narrowing previously initiated become more intense (fig. 2, tab. 1). The causes are mainly anthropogenic. Interventions take place directly in the minor riverbed, in particular the sediment mining (fig. 9, 10) which occurs between 1960s and 1980s become the main cause of the channel incision. The extracted volume represents an average thickness of 0.8 m. This, in comparison with an average incision of 1 m during this period shows that the extractions represent 80% of the bed degradation. Moreover, bank protections prevents the channel mobility and lateral sediment supply (fig. 8). These interventions have clearly favored the channel narrowing and incision, and were additionally reinforced by a decrease of the upstream sediment supply due to the reforestation of hillslopes (fig. 6) and the presence of dams (fig. 7). From 1990s onwards, in-stream mining ceases and the channel is definitively stabilized. The channel width stabilizes although the incision continues locally at a very low intensity, due to the more or less permanent fixation of the profile along the bedrock and the limitation of regressive erosion by rock thresholds. The morphological adjustments and their controlling factors are summarized in the Figure 14.

## RÉSUMÉS

Les ajustements morphologiques de la moyenne Garonne toulousaine durant les 200 dernières années sont analysés à partir de données topographiques et cartographiques anciennes. L'objectif principal est de quantifier ces changements, d'estimer leur amplitude, d'identifier les périodes d'évolution et les facteurs de contrôle associés. Malgré la faible résolution chronologique des données disponibles, les résultats mettent en évidence l'existence de trois grandes phases d'ajustements : (i) entre 1830 et les années 1860, le chenal s'exhausse et la bande active s'élargit ; (ii) entre 1860 et 1920, l'aggradation du chenal se poursuit alors que la bande active entame une phase de contraction ; (iii) enfin depuis 1920 jusqu'à ce jour, le chenal s'incise et la contraction de la bande active se poursuit. La mise en relation des ajustements latéraux et verticaux avec les facteurs de contrôle anthropiques et naturels suggère un rôle dominant des activités humaines dans le lit mineur de la Garonne notamment au cours du XX<sup>e</sup> siècle. En effet, les extractions massives de granulats conjuguées aux travaux de fixation du cours d'eau entre les années 1960 et 1980, semblent clairement impliquées dans l'accélération des phénomènes de contraction et d'incision du chenal qui ont lieu en grande partie durant cette période. Néanmoins, la contraction et l'enfoncement du chenal initiés dès la fin du XIX<sup>e</sup> - début XX<sup>e</sup> siècles pourraient avoir pour origine principale une réduction de l'activité hydro-sédimentaire de la Garonne en lien avec la sortie du Petit Age Glaciaire (PAG), les activités humaines ne venant que renforcer une dynamique déjà amorcée.

The morphological adjustments of the Toulouse middle Garonne over the last 200 years are analyzed based on topographic and cartographic data. The main goal of this study is to quantify the evolution of the channel morphological changes; estimate their amplitude, periodize the evolution and finally identify associated controlling factors. The results clearly show the existence of three major phases of adjustments: (i) between 1830 and 1860s, the channel is characterized by aggradation and widening; (ii) between 1860s and 1920, the channel is still in aggradation while beginning a phase of narrowing; and (iii) from 1920 until today, the channel

incision starts and the narrowing continues.

By linking lateral and vertical adjustments with anthropogenic and natural controlling factors our findings suggest a dominant role of human activities in the channel of the Garonne River especially during the 20<sup>th</sup> century. Indeed, the massive in-stream mining and channel works (bank protections) along the channel took place from the 60s to 80s, and seem to be clearly involved in the acceleration of narrowing and incision, which largely occurred during this period. Nevertheless, the narrowing and incision of the channel initiated at the end of the 19<sup>th</sup> - early 20<sup>th</sup> century could have mainly originated from a decrease of the hydro-sedimentary activity of the Garonne River in connection with the end of the Little Ice Age, while human activities would only be reinforcing the already initiated dynamics.

## INDEX

**Mots-clés** : Garonne, ajustements du chenal, incision, facteurs de contrôle, interventions anthropiques

**Keywords** : Garonne River, channel adjustments, channel incision, controlling factors, human interventions

## AUTEURS

### HUGO JANTZI

GEODE UMR 5602 CNRS – Université Jean Jaurès, 5 allée Antonio Machado, 31058 Toulouse, France (hugo.jantzi@univ-tlse2.fr). Tél : +33 5 61 50 36 26.

### JEAN-MICHEL CAROZZA

LIENSS UMR 7266 CNRS – Université de La Rochelle, 1 Parvis Fernand Braudel, 17042 La Rochelle, France (jean-michel.carozza@univ-lr.fr).

### JEAN-LUC PROBST

ECOLAB UMR 5245 CNRS/INPT-ENSAT – Université Paul Sabatier, avenue de l'Agrobiopole, 31326 Castanet Tolosan, France (jean-luc.probst@ensat.fr).

### PHILIPPE VALETTE

GEODE UMR 5602 CNRS – Université Jean Jaurès, 5 allée Antonio Machado, 31058 Toulouse, France (philippe.valette@univ-tlse2.fr).